

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2020.03.007

# 飞机结构健康监测技术

穆腾飞\* 李忠剑 戴喜妹

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 飞机结构健康监测技术已经在实验室实验及飞行试验中得到了成功验证,随着技术成熟度的持续提升,在未来数年,该项技术具备极大的装机应用的可能性。飞机结构健康监测技术是一项通过传感器等硬件获取结构或系统数据信息为核心的创新性技术,该项技术能够在飞机的设计、制造、运营和维护等各个过程中发挥重要作用,同时,也是未来智能航空的关键组成部分。此外,随着人工智能、大数据、5G 以及物联网概念的推进,航空结构健康监测技术的发展得到了一次飞跃的契机。本文首先全面的分析了飞机结构健康监测技术为航空领域带来的益处,并对其关键技术和应用现状进行了系统性的阐述,最后基于现有理论知识与先前工程经验创新性地提出一套民用飞机健康管理策略。

**关键词:** 结构健康监测;飞机健康管理;传感器技术;飞机维护;功能材料与智能结构

中图分类号: V267+.31; V219; V37

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

为了增强飞机的性能表现、更好地满足适航规定及市场需求,飞机设计始终向着愈加复杂的方向发展,如:机体结构所承受载荷随着飞行速度的增加而加大,飞行时间越来越长,飞机使用寿命也更加长久等。对于这种大型、复杂、设计寿命较长且昂贵的现代飞机结构而言,为了确保飞机的完整性与可靠性,扩展飞机寿命,维护是运营过程中必不可少的重要环节之一<sup>[1]</sup>。目前,飞机维护主要是通过安全寿命及损伤容限方法规划维护周期,而后基于无损检测技术对飞机结构进行检修保养,然而,这种传统的维护方式存在诸多弊端,也难以很好地满足 MSG-3 的要求<sup>[2]</sup>。

安全性方面,飞机结构在服役期间,长期承受如疲劳、冲击等形式的载荷作用,并且还承受温度、湿度和压力等易引发结构腐蚀的严苛环境考验,这些因素均可导致飞机结构的性能下降/破坏,引起灾难性事故的发生,如:1988 年阿罗哈航空公司波音 737 机身顶部在飞行中与结构分离;2001 年美国航空公

司 A300 在飞行中垂直尾翼分离。传统的周期维护方式通常是基于机群的一些运行假设而进行规划,然而,实际上由于每架飞机的任务及构成等因素不同,其维护需求的时间点乃至整机寿命均具有较大的不确定性。此外,由于周期性维护存在较大的周期间隔,而当飞机结构在这些间隔期运营过程中发生常规停机检测难以发现的致命损伤时,如继续运营该架飞机,则可能造成机毁人亡的灾难性事故。即使在周期性维护的检测过程中,由于检测精度受人为因素影响较大,误判率具有极大的不确定性,这也给飞机带来了一定的安全隐患。再者,为了收益最大化,许多航空公司飞机运营的使用谱远超设计载荷谱,同时,诸多老龄化飞机仍在运营中,而这些飞机的安全性均难以得到保障。值得一提的是,现代飞机大量采用各类新型材料,如铝锂合金、钛合金、复合材料等,并使用如超塑成型、扩散连接、整体化构件制造等先进工艺,这些新技术的应用,使得结构的损伤模式更加复杂且更难以从表面发现结构失效,对结构的安全性提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。然而,传统的维护方式并无法合理的解决上述问题。为了

\* 通信作者。E-mail: mutengfei@comac.cc

引用格式: 穆腾飞,李忠剑,戴喜妹. 飞机结构健康监测技术[J]. 民用飞机设计与研究,2020(3):35-41. MU T F, LI Z J, DAI X M. Aircraft structural health monitoring technology[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(3):35-41 (in Chinese).

提高飞机运营安全性,我们需要一种实时连续监测技术以在线评估结构的完整性和可靠性,并实现有效的飞机健康管理。

经济性方面,据统计,飞行机组人员费用、飞机燃料费用、飞机维护费用、飞机保险费用和飞机折旧费用分别占飞机运营费比例的 6%、5%、24%、29% 和 36%<sup>[4]</sup>。在上述费用中,具有最大降低空间的则是飞机的维护费用;时间方面,传统的周期性维护缺少单架飞机真实相关数据的支撑,可能增加不必要的维护次数或错过应进行维护行为的最佳时刻,此外,在维护检测中,停机检测、拆卸检测等方式均耗时较长、效率低下;人力方面,维护行为需要对大量专业人员进行长期培训,使其达到专业水准,维护人员先借助专用仪器设备对飞机进行检测,而后再按照维修手册完成飞机修理,这种维护需要的人力成本极大。上述因素均造成了较低的维护经济性,因此,为了提高市场竞争力,需要发展基于结构状况数据的视情维护技术/预测性维护技术以避免次数多、耗时长、成本高的维护行为,减少停机时间,延长结构寿命。

由上述可知,传统的维护行为已难以更好地满足客户对飞机安全性和经济性等指标的需求,因此,必须对飞机的运行状态进行在线连续监控和健康管理,基于获得的信息实现视情维护/预测维护,以确保飞机的安全服役以及运营经济效益最大化。以永久安装在飞机结构表面或嵌入复合材料结构内部的传感器网络为基础的结构健康监测技术 (Structural Health Monitoring, 简称 SHM) 是一项革命性的创新技术,该技术能够通过传感器网络长久在线实时监测飞机结构整体或关键区域的结构健康状态、环境状态及运行状态等信息,在飞机的安全性和经济性等方面发挥重要作用。此外,SHM 技术的应用还可以获取诸多益处,如<sup>[5-6]</sup>:传感器技术的发展能够快速推进智能航空领域的飞越;SHM 系统获取的大数据可用来优化飞机设计、实现设计边界试验,以及飞机产品从材料到制造、从服役到退役的全飞机周期过程的监控及管理。本文以结构健康监测为基点,展开对飞机健康管理概念的讨论,分析结构健康监测技术为飞机带来的益处,如图 1 所示。



图 1 结构健康监测的益处

## 1 结构健康监测系统

结构健康监测技术涉及了传感器、信号处理、数据管理、系统集成、通讯等多个学科领域,该项技术并非像传统的无损检测技术一样是一种人为行为,而是一种类似于人类仿生体系的智能行为<sup>[7]</sup>。结构健康监测系统根据功能不同可分为主动监测和被

动监测两种:主动监测通过驱动元件发出信号,传感元件接收信号,基于输入输出信号分析复合材料分层、脱层和脱粘等损伤以及金属材料疲劳裂纹、腐蚀和结构断裂等损伤;被动监测通过传感元件接收外界因素产生的信号,获取如振动、气动载荷、应力应变、外部冲击、温度湿度等结构及环境信息。SHM 系统主要由集成在结构上的传感器网络、信号驱动与采集硬件、控制与信号处理软件三部分组成,如图 2 所示。

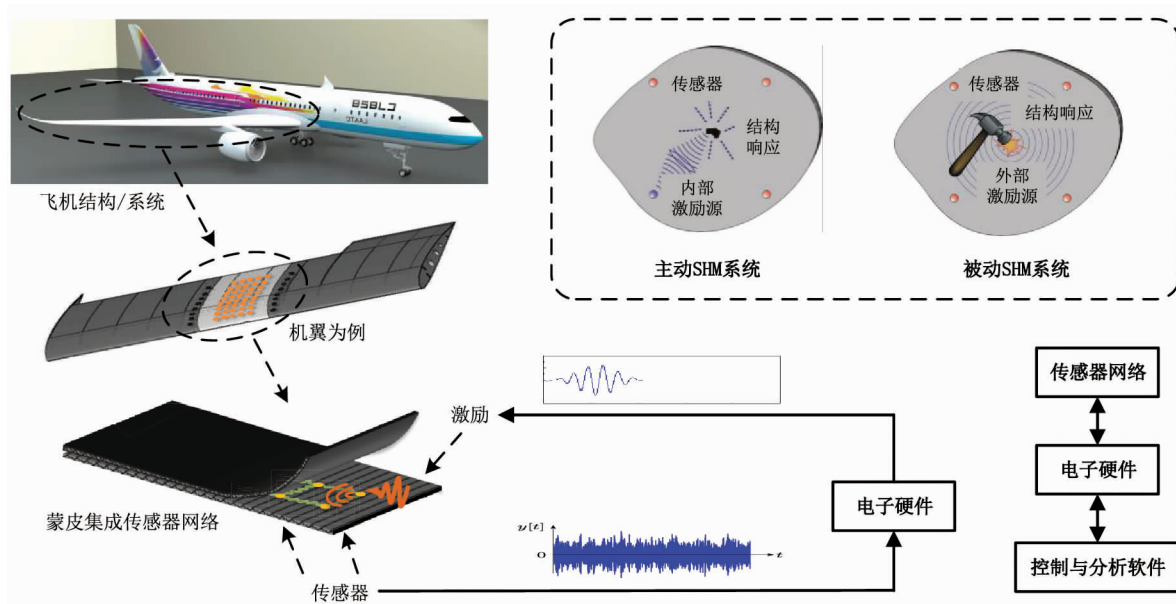


图2 结构健康监测系统

## 2 SHM 传感器技术

在结构健康监测系统中,最为关键的硬件载体为集成于结构中的传感器元件。目前,结构健康监测系

统中所发展的传感器主要有应变式传感器、加速度传感器、压电式传感器、声发射传感器、光纤传感器、比较真空监测传感器、电涡流传感器、智能涂层传感器、无线传感器和 MEMS 传感器等,如图 3 所示<sup>[8]</sup>。



图3 结构健康监测典型传感器

### 2.1 应变式传感器

应变式传感器(Strain Gauge, 简称 SG)可测量结构部位多个方向的应变情况,其中,电阻应变片是应变式传感器最常见的类型,它将所测得弹性敏感元件的应变转为电阻变化量,进而获得所测量区域的载荷谱和位移谱等多种物理量。

### 2.2 加速度传感器

加速度传感器(Accelerometer)可基于压电效

应、电容效应、热气泡效应以及光效应等原理制造而成,其基本原理都是由于结构自身运动促使某个介质产生变形,进而通过测量其变形量并用相关电路转化成电压输出,最终获得结构部位振动加速度信息。通过对加速度信号进行处理,不仅可以获得所测量部位的速度和位移信息,还可以获取结构刚度、固有频率等特性,进而监测结构损伤。

### 2.3 压电式传感器

压电式传感器 (Piezoelectric Transducer, 简称 PZT) 基于压电材料的压电效应进行工作, 既可以作为驱动器主动激励结构的应力波和结构自身振动, 也可以作为传感器被动接收结构表面传播的应力波信号, 还可以用来测量应力应变等信息。斯坦福大学 SACL 基于柔性电路技术发展的智能层极大地推动了压电式传感器在结构健康监测领域的应用。

### 2.4 声发射传感器

声发射传感器 (Acoustic Emission, 简称 AE) 的核心部分通常为经过特定工艺流程后的陶瓷、半导体、光导纤维等物质, 当这些物质接受到由于结构损伤或人为激励释放的声波或超声波时, 其物理特性会随着外界待测量作用而发生变化, 进而基于此原理实现结构的损伤监测。

### 2.5 光纤传感器

光纤传感器 (Fibre Optic Sensor, 简称 FOS) 的原理是当光传输至调制区时, 由于外界被测量的变化导致光的性质发生变化, 进而可从光的性质改变中获取结构的表征信息。在各类光纤传感器中, 以具有波长可调制以及光栅均匀分布特性的光纤布拉格光栅传感器 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 的使用最为广泛, 常用于监测结构温度、应力应变以及内部损伤等信息。

### 2.6 比较真空监测传感器

比较真空监测传感器 (Comparative Vacuum Monitoring, 简称 CVM) 由真空管路及其相邻的气压管路组成, 当真空通路下出现裂纹时, 该通路的真空环境被破坏, 进而形成相对真空的状态并以此压差的变化作为特征指标监测结构表面裂纹的萌生与扩展, 也可用于检测结构表面腐蚀。

### 2.7 电涡流传感器

电涡流传感器 (Eddy Current Transducer, 简称 ECT) 基于电涡流效应可对电磁性材料进行接触/非接触式裂纹或部件连接程度监测。其中, 电涡流柔性薄膜已成为了电涡流传感器在航空领域应用的主要形式, 常被用于齿轮、叶片以及紧固件等结构的监测。

### 2.8 智能涂层传感器

智能涂层传感器 (Smart Coating, 简称 SC) 是一种集成了压电、铁电或纳米碳管等元素的结构表面涂层/漆, 该涂层/漆主要由三个基层构成, 即内部驱

动层、中部传感层和外部保护层。当集成智能涂层传感器的结构出现裂纹并扩展等特征时, 驱动层也会表现出相同的特征, 并引领传感层跟随着表现出相同的特征, 进而基于传感层的电阻改变量实现结构表面健康监测。

### 2.9 无线传感器

无线传感器 (Wireless Sensor, 简称 WS) 通常由集成的传感模块、电源模块、数据采集及处理模块和无线通讯模块组成, 由这些无线传感器节点构成无线传感器网络, 进而通过该网络协同监测所需的结构信息。无线传感器网络可以有效地避免引线限制、导线腐蚀和电磁干扰等带来的弊端, 极大地增加监测系统的灵活性并降低飞机引线的数量和重量, 已经成为了航空结构健康监测技术的热点。

### 2.10 MEMS 传感器

MEMS (Micro Electromechanical System, 简称 MEMS) 传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的微型传感器, 这种传感器的尺寸仅为几毫米甚至更小, 其内部结构尺寸一般在微米或者纳米量级。由于微型传感器具有高集成度的特点, 使得它更加易于实现智能化及多功能化, 如嵌入信号自处理能力以及无线功能等。

### 2.11 其他类型传感器

本文以结构健康监测技术为基点, 扩展对飞机健康管理概念的探讨, 故此, 在飞机健康管理概念中, 还有诸多类型的传感器单元, 如: 压力传感器, 即用于流体压强测量、海拔感知、流量测量、泄漏探测等功能的传感器, 温度传感器和湿度传感器等。由此可见, 在飞机状态监测及健康管理的概念中, 是以大量的不同类型的传感器网络为核心的数据化系统。当然, 这些传感器还应根据自身数据的特点或不同类型传感器融合数据的特点, 配合适合度高的算法, 才能更好地发挥该系统的最大作用。

## 3 SHM 相关技术

由上述可知, 在结构健康监测系统中, 传感器技术是其核心部分, 与此相关联的其它相关技术, 亦是发挥该系统作用的关键, 主要涉及技术如下:

### 3.1 传感器集成技术

传感器集成技术为将传感器有效地集成于结构/系统中的一项技术, 如采用柔性印刷等技术可将传感器网络设计为智能夹层, 以解决减小传感器安



装/集成误差、电绝缘、相互串扰等问题,并有助于实现功能性材料和智能结构。

### 3.2 数据处理技术

如果说传感器网络是结构健康监测系统的硬件核心,那么,信号处理技术则是 SHM 系统的软件核心,其包括信息融合、数据处理、系统建模和模型修正、系统辨识及趋势预测、过程/结果可视化、自主作用和决策等诸多方面,该技术对不同类型传感器获得的数据进行综合分析,进而获得对结构信息/状态信息更有效地认知。

### 3.3 系统集成技术

系统集成技术包括硬件集成和软件集成两部分。硬件系统集成包括上述的传感器集成技术,以及机载硬件间的稳定性、微型化、轻质化和协调等;软件系统集成包括数据存储、处理以及显示等,此外,软件能力应与硬件能力相匹配。

### 3.4 传感器布置技术

集成于结构/系统中的多种类型传感器,配合相应的算法进行工作,传感器的类型搭配、数量设置与位置优化布置亦是一项关键的技术,其中,也包括区域性传感器网络的数据激励/采集、有线/无线传输和分析等方面。

### 3.5 传感器网络自我诊断和维护技术

传感器网络集成于结构/系统中,首先应保证传感器网络的生存能力、耐用性、可靠性、精度和使用寿命高于飞机结构/系统,当然,在部分传感器功能缺失的情况下,SHM 系统也应具有实现其功能的能力,为了确保 SHM 系统自身的完整性,传感器网络的自我诊断和维护技术是必不可缺的一项智能技术。

### 3.6 复杂和极端环境下的 SHM 技术

复杂环境和极端环境对传感器的集成技术、传感器本身的工作能力及相关的数据处理技术提出了更高的要求,是航空器 SHM 技术发展历程中的一项重大挑战,该技术的推进将极大的扩充 SHM 技术的应用范围。

### 3.7 微型化技术

由于航空领域对重量及空间的特殊要求,飞机 SHM 硬件的组成部分应具备微型化、轻质化、低功耗等特性,这也要求相关的软件算法应尽可能的减少计算量及计算时间,在此过程中,SHM 系统的成本控制也是需要关注的指标。

### 3.8 融合设计技术

首先,设计集成有传感器网络的结构/系统时,

应采用融合设计思路,将 SHM 技术融入到设计过程中,确保结构/系统及传感器的性能;其次,由于基于传感器获得的大数据具有较高的完整性和精准性,故此,基于数据挖掘的飞机优化设计技术将为飞机设计提供一条全新的思路。

### 3.9 通讯技术

通讯技术可分为有线和无线两种类型:1)有线通讯技术基于引线作为传输介质,其可靠性高但具有引线限制、导线腐蚀和电磁干扰等弊端,目前,为了减小引线的数量和重量,有线通讯技术的引线也朝着单线多通道微型化方向发展;2)无线通讯技术则是目前的一个发展趋势,其具有灵活性高、运用范围广等特点,未来航空 SHM 系统通讯网络必将由无线通讯网络构成。

## 4 SHM 应用现状

经历了数十年的发展,结构健康监测技术已经逐步登上产业应用的舞台<sup>[9]</sup>。1998 年,NASA 在 X-33 航天飞机中提出了运载器健康管理技术,该技术通过光纤传感器监测低温油箱的安全情况;此外,NASA 还开发基于经验融合技术的混合诊断工具以监测航天飞机引擎。至此以后,SHM 技术得到了广泛的认知和快速的发展。在美国<sup>[10]</sup>:诺斯罗普-格鲁门公司基于压电传感器和光纤传感器对 F-18 机翼结构损伤及应变进行了监控;美国国防部基于加速度传感器对 UH-60A 行星齿轮架裂纹进行了监测;波音公司基于压电传感器对直升机旋翼叶片的疲劳裂纹进行了监测,还在 F-35 飞机上运用了健康诊断和管理技术,此外,它还推出了飞机健康管理系统,该系统主要用于飞机维护,目前已经在波音 747、波音 777 和波音 787 等机型的研制过程中得到了应用;西北航空公司和达美航空公司基于 CVM 传感器对 DC-9、波音 757 和波音 767 飞机机翼、尾翼等结构损伤进行了真实飞行监测。

(1) 在欧洲的应用。在联合研制的 Euro-fight2000 上应用了基于光纤传感器的 SHM 技术对飞行载荷进行监测;空客公司采取了内部研究和内外联合研制的方式,最小化时间和成本地推进 SHM 技术的发展,并将 SHM 技术划分为结构监测、服役飞机维护、设计减重和服役飞机维护、减重及制造装配质量评估四个层次,全面推进其结构健康监测系统的发展,其推出的飞机维护分析系统已在空客

A320、A350 和 A380 得到了应用。

(2) 在我国的应用。基于智能涂层传感器对某些型号的歼击机系列进行了实验室级别的全集疲劳裂纹监测<sup>[11]</sup>。

(3) 在诸多其它地区的应用。加拿大空军对数架 CF-18 战斗机的机体结构进行了运行同步疲劳监控,使得该型号机群使用寿命延长了 12 年<sup>[12]</sup>。巴西航空公司采用 CVM 和 PZT 技术在 E-190 飞机上进行了飞行试验,取得了较好的效果。

在最新美国各研究团队提出的 N+3 代飞机设计方案中,SHM 技术均作为关键技术出现。由此可见,SHM 技术具有广泛的应用前景。

## 5 飞机健康管理

本文以结构健康监测技术为基点,进一步展开了对飞机健康管理的讨论。广义上,飞机健康管理可蕴含从材料到制造,从飞机服役到退役,甚至包括退役后的超龄飞机管理,但此处,仅对飞机常规服役期间的健康管理进行策略设计。目前,飞机健康管理主要囊括系统级别和结构级别两个方面的监控和管理,诸多学者对此进行过研究并取得一些有价值的成果<sup>[13-14]</sup>。在此,本文基于现有理论知识与先前的工程经验,从大数据的角度出发,发展了一套飞机健康管理策略如图 4 所示。

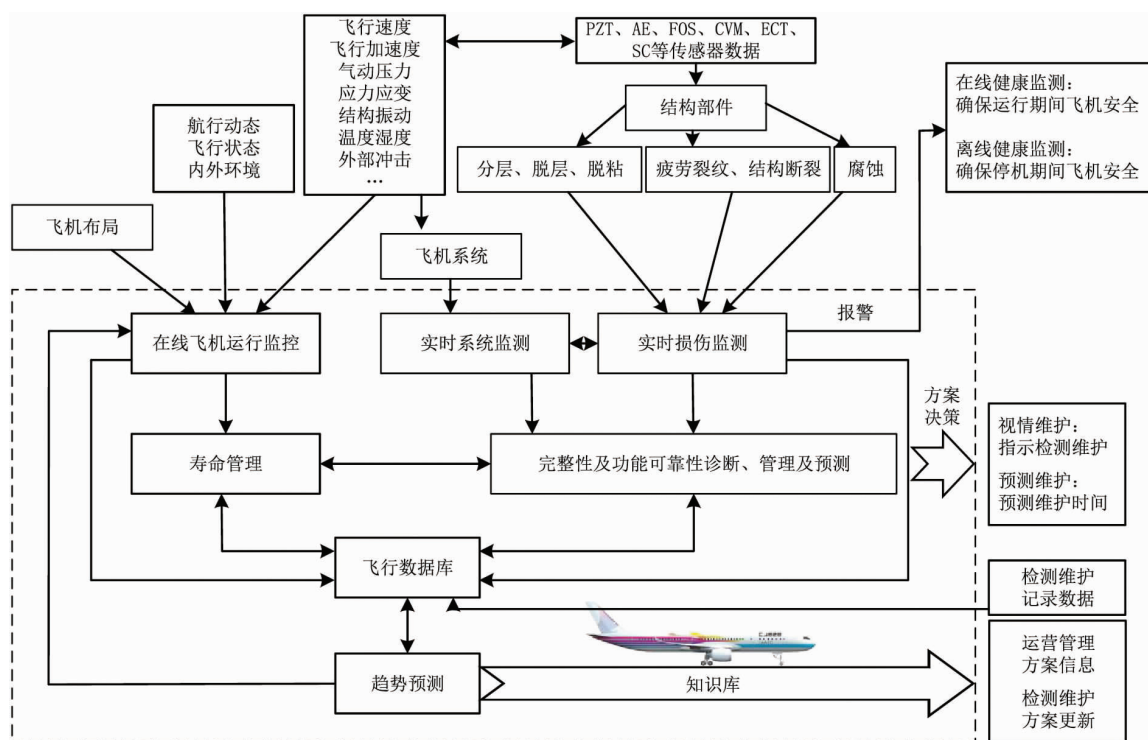


图 4 飞机健康管理策略

## 6 结论

结构健康监测技术是以传感器实时数据为核心的一项创新性技术体系,该技术可在飞机的设计、制造、运营和维护等各个过程中发挥重要作用。同时,结构健康监测技术能够极大地推进功能化材料及智能结构的发展,也是未来智能航空的关键核心技术<sup>[15]</sup>。随着飞机结构健康监测技术成熟度的提升,在未来数年,该项技术将会实现在民用航空领域的大范围工程应用,并与含系统监测及管理等技术相融合,搭建全方位的飞机健康管理平台,实现数据飞

机新理念,开创智能航空新时代。

### 参考文献:

- [1] RULLI R P, DOTTA F, DASILVA P A. Flight tests performed by EMBRAER with SHM systems[C]// Key Engineering Materials. [S. l.]: Trans Tech Publications, 2013, 558: 305-313.
- [2] RULLI R P, DOTTA F, GABRIEL D O, et al. Advancements on the adoption of SHM damage detection technologies into embraer aircraft maintenance procedures [C]// Structural Health Monitoring. [S. l.]:

- DEStech Publications, 2017, 1001: 3-10.
- [3] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1): 1-16.
- [4] 王利恒, 薛景锋, 宋昊, 等. 飞机结构健康监测研究现状述评[J]. 航空维修与工程, 2009(2): 56-58.
- [5] SUN Y J, YUAN S F, QIU L, et al. Structural health monitoring based on Lamb wave phased array and image enhancement[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009(7): 1325-1330.
- [6] 卿新林, 王奕首, 赵琳. 结构健康监测技术及其在航空航天领域中的应用[J]. 实验力学, 2012, 27(5): 517-526.
- [7] KURNYTA A, DRAGAN K, DZIENDZIKOWSKI M. Assessment of sensor technologies for aircraft SHM systems[J]. Fatigue of Aircraft Structures, 2013(5): 53-59.
- [8] OSTACHOWICZ W, ALFREDO G. New trends in structural health monitoring[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] 孙侠生, 肖迎春. 飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J]. 航空学报, 2014, 35(12): 3199-3212.
- [10] 袁梅, 鲍鹏宇, 付重, 等. 飞机结构健康监测技术及传感器网络[J]. 航空制造技术, 2008(22): 44-48.
- [11] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [12] 尚柏林, 宋笔锋, 杨建军. 飞机结构健康监测传感器新技术[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 289-291.
- [13] 马小骏, 左洪福, 刘昕. 大型客机运行监控与健康管理系统设计[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 119-126.
- [14] TREGO A, HAUGSE E, AVERY R, et al. Structural health management architecture using sensor technology: US20060004499A1[P]. 2006-01-05.
- [15] SALOWITZ N, GUO Z, LI Y H, et al. Bio-inspired stretchable network-based intelligent composites[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(1): 97-105.

#### 作者简介

**穆腾飞** 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 结构健康监测、飞机健康管理、飞机总体设计。E-mail: mutengfei@comac.cc

**李忠剑** 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机总体设计。E-mail: lizhongjian@comac.cc

**戴喜妹** 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机运行设计。E-mail: daiximei@comac.cc

## Aircraft structural health monitoring technology

MU Tengfei\* LI Zhongjian DAI Ximei

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** In recent years, aircraft structural health monitoring technology has been developed rapidly. Up to now, this technology has been successfully verified in the laboratory experiment and flight test. In next several years, it is much possible for this technology to achieve the aviation industrial application. Aircraft structural health monitoring technology is an innovative technology, the key component of which is obtaining structure or system data information based on sensor network. Aircraft structural health monitoring technology plays a significant role in the design, manufacture, operation and maintenance of aircraft, and this technology is also the key component of intelligent aviation. In addition, with the development of artificial intelligence, big data, 5G and internet of things, there has been a leap development opportunity for aircraft structural health monitoring technology. In this paper, the benefits of aircraft structural health monitoring technology were firstly analyzed. Besides, the key technology & application for aircraft structural health monitoring technology were described. Finally, an innovative aircraft health management strategy was proposed based on previous theoretical knowledge and engineering experience about structural health monitoring.

**Keywords:** structural health monitoring; airplane health management; sensor technique; airplane maintenance; functional material and intelligent structure

\* Corresponding author. E-mail: mutengfei@comac.cc